

令和 3 年 5 月 26 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06371

研究課題名(和文)ピラー状IMC有効分散制御によるパワーデバイス用大面積接合

研究課題名(英文)Large area bonding for power device by effective dispersion of pillar-shaped IMC

研究代表者

荘司 郁夫 (Shohji, Ikuo)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：00323329

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：パワー半導体チップ接合部の耐熱疲労性の向上を目的として、鉛フリーはんだ中へピラー状金属間化合物(IMC)を分散生成させる手法を研究した。Sn-Ag-Cu-In系はんだを研究対象として、ピラー状IMCの生成に必要な接合温度、接合温度からの冷却速度を明らかにした。パワー半導体特有のパワーサイクル(急加熱急冷サイクル)を模擬した試験を実施して、ピラー状IMC分散接合部が優れたき裂進展抑制効果を発揮することを示した。さらに、はんだ材自身の耐熱疲労性の向上を目指して、新規にSn-Sb-Ag系はんだにNiやGeを微量添加した高温鉛フリーはんだを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

パワー半導体チップのはんだ接合部を対象として、その耐熱疲労特性の向上を図る接合材料の研究を行った。具体的には接合材である鉛フリーはんだ中にピラー状の金属間化合物を分散生成させて、接合部中に発生するき裂の進展を抑制する構造を開発した。同時に、NiやGeを微量添加したSn-Sb-Ag系高温鉛フリーはんだを新規に開発した。開発した接合部に対し、パワー半導体で問題となる急加熱急冷サイクルを模擬したパワーサイクル試験を実施し、優れた耐熱疲労特性を有することを実証した。本研究の成果は、SiCやGaNなどの次世代パワー半導体への適用が期待される。

研究成果の概要(英文)：To improve thermal fatigue resistance of the joint of the power semiconductor chip, the dispersion method of pillar-shaped intermetallic compounds (IMCs) generated in lead-free solder was investigated. For Sn-Ag-Cu-In system solder, the bonding temperature and the cooling rate from it to be required for formation of pillar-shaped IMCs were clarified. The power cycle test that simulates rapid heating and cooling cycles loaded to the power semiconductor chip was conducted and it was found that the joint with dispersed pillar-shaped IMCs has an excellent suppressing effect on fatigue crack propagation. Moreover, a Sn-Sb-Ag system alloy with small amount of Ni and Ge was developed as a new high-temperature lead-free solder to improve the thermal fatigue resistance of solder itself.

研究分野：金属組織学、接合科学

キーワード：パワー半導体 鉛フリーはんだ パワーサイクル き裂進展 金属間化合物

### 1. 研究開始当初の背景

世界的なグリーン・ニューディール政策等によりパワー半導体市場が拡大する中、Si パワー半導体は性能限界に近付いており、高温動作可能で高耐電圧・高熱伝導度を有する SiC や GaN が、省エネ効果が期待できる次世代パワー半導体として注目されている。その半導体をモジュール化するパワーデバイスでは、パワー半導体が絶縁基板の銅電極上に高温系はんだで接合され、外部端子との接続にはピン材を金属配線に用いて半導体素子上に接合する方法などが提案されてきた。その構造では、Al 線で周囲の外部端子と接続する既存法に比べ、配線長が短く低インダクタンス化が可能となり、次世代パワー半導体に求められる高周波数動作時の損失低減とデバイスの小型化が実現できる。

また、高放熱性が求められるパワーデバイスでは、絶縁基板は Al 製高放熱板に接合される。上記のはんだ接合も含め、接合部は数～数十 mm 角サイズであり、一般的な電子部品のそれ(数十～数百 μm)に比べはるかに大きい。そのため、接合部の信頼性評価には、クラックの発生寿命に加えクラック進展による破断寿命の評価も必要であり、接合材中のクラック進展に関する学術的な研究が進められてきた。更に、高速スイッチングが求められるパワー半導体に特有のパワーサイクル(温度範囲 150°C程度での数～数十秒での急加熱急冷サイクル)耐性も必要であり、実機での評価は進められているが学術的なアプローチはほとんどなされていなかった。

半導体チップの接合については、Zn や Bi 系の高温はんだや酸化銀、Ag ペースト、Ag スパッタ膜が接合材として検討されてきた。高温はんだについては有効な材料は開発されておらず、Ag を利用した接合は数 mm 角サイズまでの応用可能性はあるが、それ以上の大面積接合には対応できない状況にある。

研究代表者らは絶縁基板と高放熱板の接合部を対象として、接合部にピラー状の金属間化合物(Intermetallic Compound: IMC)を分散生成させてクラックの進展を抑制し、耐熱サイクル性に優れた大面積接合の創製に成功してきた。IMC の生成に有効な Sn-Ag-Cu 系はんだへの添加元素および接合条件を調査し、上下の電極を繋ぐような IMC を分散生成できれば、接合部でのクラックの進展が IMC/はんだ界面にて抑制されることを明らかにした。そこで、ピラー状 IMC の分散生成を制御できれば、より高温に曝されるパワー半導体と絶縁基板との接合部への展開も可能になると考えた。

### 2. 研究の目的

本研究では、始めに絶縁基板と高放熱板の接合部を研究対象として、第三元素を添加した Sn-Ag-Cu 系はんだ中でピラー状 IMC を均一分散配向させる制御法を探索することを目的とした。続いて、ピラー状 IMC 分散接合部の熱およびパワーサイクル環境での劣化損傷挙動を解明して、接合部の熱・パワーサイクル寿命の評価手法を検討した。より高温での動作が求められるパワー半導体と絶縁基板接合部にも展開するために、応募者らの研究で 150°Cの高温でも疲労寿命の低下が見られない Sn-Sb 系に着目し、第三元素を添加した新規接合材を開発することも目的とした。

### 3. 研究の方法

研究目的を達成するために次の三項目について研究を実施した。研究方法の概略についても以下に示す。

#### (1) ピラー状 IMC の核生成・配向メカニズムの解明とその制御法の探求

これまでの研究にて比較的広範囲の接合条件でピラー状 IMC の生成が見られた Sn-3.0Ag-0.7Cu-5.0In (mass%)を接合材として、図 1 のような接合体を作製した。被接合材は Cu 板および 3 μm 厚の電解 Ni めっきを施した Cu 板の二種類とした。接合温度、接合時間および凝固時の冷却速度を変化させてピラー状 IMC の生成形態を調査した。

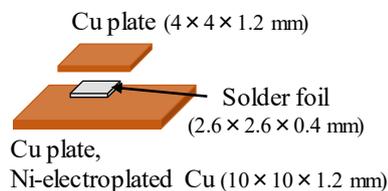


図1 試験片の仕様

#### (2) ピラー状 IMC 分散接合部の熱・パワーサイクル劣化損傷挙動調査

パワーサイクル模擬試験機を用いてパワーサイクル試験を実施し(温度範囲: 100～200°C、頻度: 3 cycles/min)、き裂進展挙動を超音波映像装置(Scanning Acoustic Tomograph: SAT)にて観察した。また、実際のパワーモジュールを模した試験片にて熱サイクル試験(温度範囲: -40～120°C、頻度: 1 cycle/h)を実施して接合部の熱疲労寿命も評価した。

#### (3) Ag 添加 Sn-Sb 系高温はんだを用いたパワー半導体直下の接合への応用検討

より高温に曝されるパワー半導体と絶縁基板との接合部への展開を目指し、Sn-Sb-Ag 系の三元包共晶成分を有する Sn-6.4Sb-3.9Ag(mass%)をベースとして、高温での耐熱疲労性に優れた接合材を新規開発するために、高温での疲労特性などを調査した。

#### 4. 研究成果

##### 4. 1 ピラー状 IMC の生成・配向メカニズムとその制御方法の検討

図2および図3に Sn-3.0Ag-0.7Cu-5.0In はんだを用いて各種接合条件にて接合した接合部の断面観察結果を示す。図ははんだの主成分である Sn をエッチング処理して IMC を露出させて反射電子像による観察を行ったものである。Ni めっき処理材の方がややピラー状 IMC の生成が生じにくいことがわかるが、接合温度の上昇に伴い生成するピラー状 IMC の生成量が増加することがわかる。また、その成長方向ははんだ接合部の冷却方向に相当する上下方向となることも確認できる。この結果より、ピラー状 IMC の生成は、溶融はんだへの Cu の溶解量の影響が大きくなることが明らかとなった。

次に、IMC をピラー状に生成させる有効因子として、接合プロセスにおける接合温度からの溶融はんだの冷却速度の影響について調査した。図4にその結果について示す。図4は接合部断面の反射電子像を示している。冷却速度が遅く過冷度が小さい場合には、溶融はんだ中へのピラー状 IMC の生成は起こりにくく、冷却速度 1°C/s 程度にピラー状 IMC が出現する過冷度限が存在すること、ピラー状 IMC の安定生成には冷却速度 3°C/s 程度以上が必要となることを明らかにした。また、冷却速度 0.2°C/s 以下では、界面に Cu-Sn 系の IMC がスカラップ状に生成し、ピラー状 IMC は生成されることがわかった。

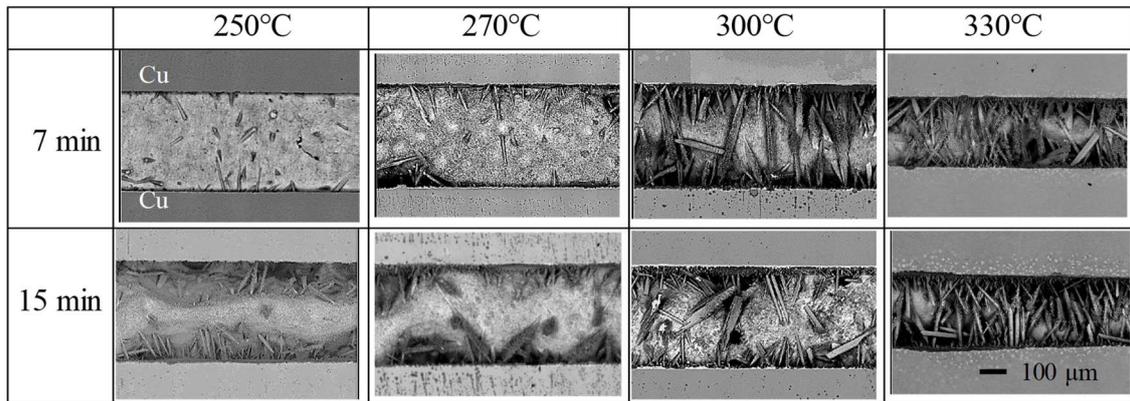


図2 ピラー状 IMC の生成に及ぼす接合時間の影響(Cu/Cu 接合、凝固時冷却速度: 2.0°C/s)

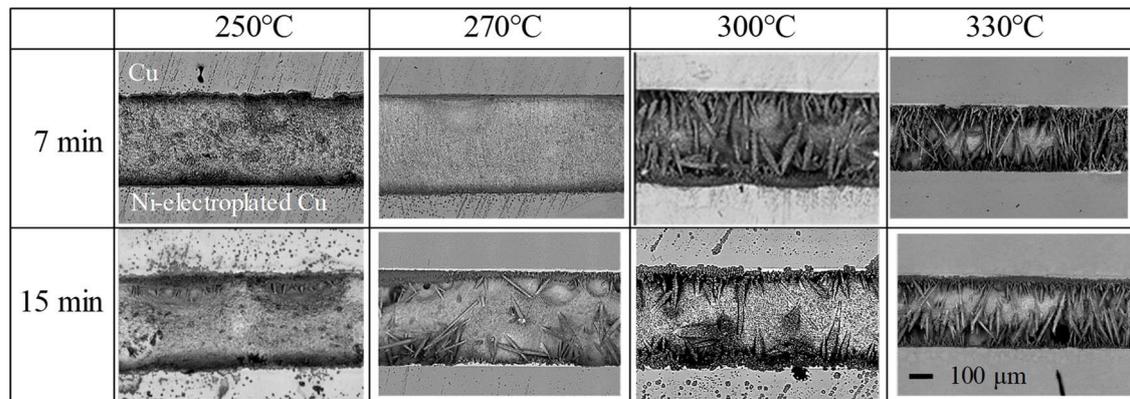


図3 ピラー状 IMC の生成に及ぼす接合時間の影響(Cu/Ni めっき Cu 接合、凝固時冷却速度: 2.0°C/s)

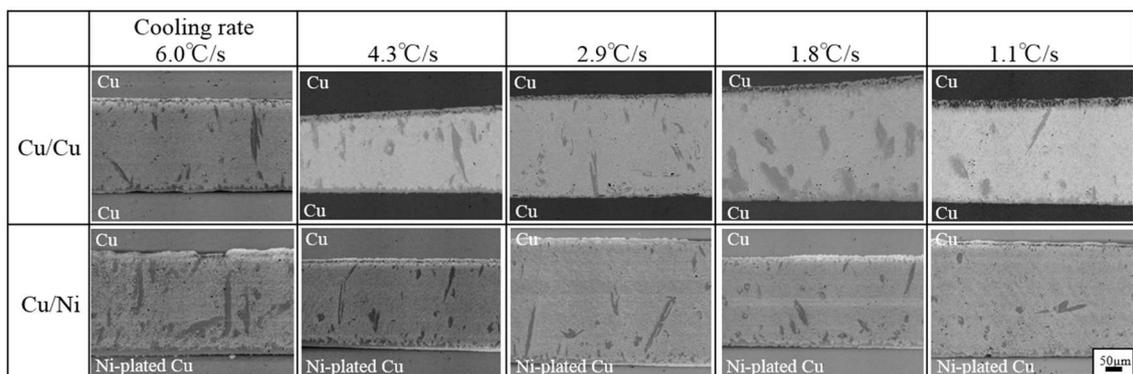


図4 ピラー状 IMC の生成に及ぼす凝固時冷却速度の影響(接合温度: 300°C、接合時間: 10 min)

#### 4. 2 ピラー状 IMC 分散接合部の熱・パワーサイクル劣化損傷挙動

図 5 にパワーサイクル模擬試験と SAT 観察により評価した接合部のき裂進展挙動を示す。接合体は、Ti/Ni/Au めっき処理を施した 3x3x0.5 mm の Si チップを 10x10x1.2 mm の Cu 板にはんだ材で接合したものを用いた。接合条件は SAC はんだ以外は 300°C10 min とし、Sn-3.0Ag-0.7Cu-5.0In はんだについては、凝固時の冷却速度を変えたものも用意した。SAC はんだは通常のリフロー法にて接合する条件に近くするために 270°C6 min の接合条件とした。この条件では接合部にはほとんどピラー状 IMC は生成しない。図のき裂面積率は、SAT 観察により求めた、初期接合部面積に対するき裂の進展面積の比を表している。図より、既存の SAC はんだ接合部よりもピラー状 IMC を分散させた Sn-3.0Ag-0.7Cu-5.0In はんだの方がき裂の進展が抑制されることが明らかとなった。また、接合凝固時の冷却速度を速くしてピラー状 IMC の生成を促進する方が、き裂進展を抑制する効果が高い傾向も確認された。さらに、Sn-Sb-Ni 系はんだのき裂進展抑制効果も大きいことも明らかとなった。

実際のパワーモジュールを模した試料にて-40~120°Cでの熱サイクル試験を実施したところ、既存 SAC はんだの熱疲労寿命が 487 サイクルであったのに対して、ピラー状 IMC 分散 Sn-3.0Ag-0.7Cu-5.0In はんだ接合部では 1758 サイクルにまで熱疲労寿命が向上することも確認された。

#### 4. 3 パワー半導体接合用 Ag 添加 Sn-Sb 系高温はんだの開発

はんだ材自身の耐熱疲労性の向上を目指して、高温鉛フリーはんだである Sn-Sb 系はんだをベースにして第三元素の添加による新合金の開発を行った。その結果、Sn-Sb 系はんだに Ni を微量添加することにより高温での疲労特性が向上することを明らかにした。また、Sn-Sb 系はんだに比べ、Sn-Sb-Ag 系はんだの方が高温疲労特性に優れることを明らかにし、さらに Ni および微量添加することによりさらなる向上効果が得られることも明らかにした。図 6 は、各はんだの微小試験片(直径: 0.5 mm、標点距離: 2 mm)を用いて実施した低サイクル疲労試験の結果を示す。Sn-5Sb に比べ Sn-6.4Sb-3.9Ag の方が優れた高温疲労特性を有することが確認され、Ni の微量添加によりわずかではあるが疲労寿命がさらに向上することが確認される。

図 7 に、Sn-Sb-Ag 系はんだを用いて図 5 と同様のパワーサイクル模擬試験を行った結果を示す。接合部厚さおよびフィレット形状の適性化を図ることにより、き裂の発生進展を著しく抑制することが可能となった。また、Sn-Sb-Ag 系はんだへの微量 Ni および Ge の添加が耐パワーサイクル特性の向上にも有効であることを明らかにした。

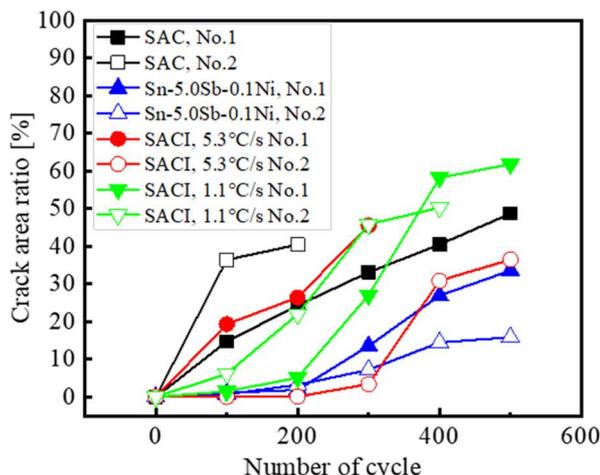


図5 パワーサイクル模擬試験によるき裂進展挙動 (SAC: Sn-3.0Ag-0.5Cu, SACI: Sn-3.0Ag-0.7Cu-5.0In)

さらに、Sn-Sb-Ni 系はんだのき裂進展抑制効果が高い傾向も確認された。

実際のパワーモジュールを模した試料にて-40~120°Cでの熱サイクル試験を実施したところ、既存 SAC はんだの熱疲労寿命が 487 サイクルであったのに対して、ピラー状 IMC 分散 Sn-3.0Ag-0.7Cu-5.0In はんだ接合部では 1758 サイクルにまで熱疲労寿命が向上することも確認された。

#### 4. 3 パワー半導体接合用 Ag 添加 Sn-Sb 系高温はんだの開発

はんだ材自身の耐熱疲労性の向上を目指して、高温鉛フリーはんだである Sn-Sb 系はんだをベースにして第三元素の添加による新合金の開発を行った。その結果、Sn-Sb 系はんだに Ni を微量添加することにより高温での疲労特性が向上することを明らかにした。また、Sn-Sb 系はんだに比べ、Sn-Sb-Ag 系はんだの方が高温疲労特性に優れることを明らかにし、さらに Ni および微量添加することによりさらなる向上効果が得られることも明らかにした。図 6 は、各はんだの微小試験片(直径: 0.5 mm、標点距離: 2 mm)を用いて実施した低サイクル疲労試験の結果を示す。Sn-5Sb に比べ Sn-6.4Sb-3.9Ag の方が優れた高温疲労特性を有することが確認され、Ni の微量添加によりわずかではあるが疲労寿命がさらに向上することが確認される。

図 7 に、Sn-Sb-Ag 系はんだを用いて図 5 と同様のパワーサイクル模擬試験を行った結果を示す。接合部厚さおよびフィレット形状の適性化を図ることにより、き裂の発生進展を著しく抑制することが可能となった。また、Sn-Sb-Ag 系はんだへの微量 Ni および Ge の添加が耐パワーサイクル特性の向上にも有効であることを明らかにした。

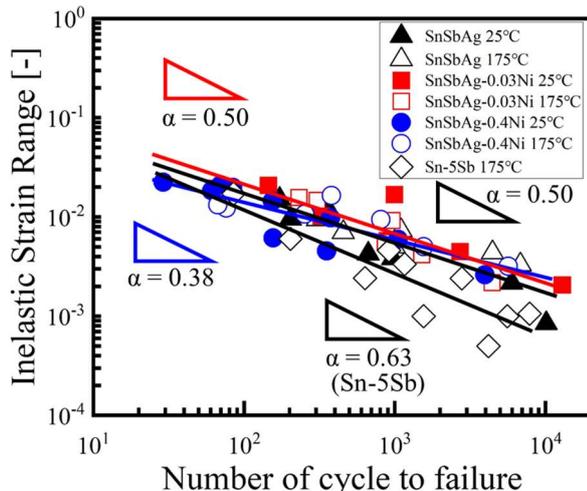


図6 Sn-Sb系鉛フリーはんだの高温疲労特性 (SnSbAg: Sn-6.4Sb-3.9Ag)

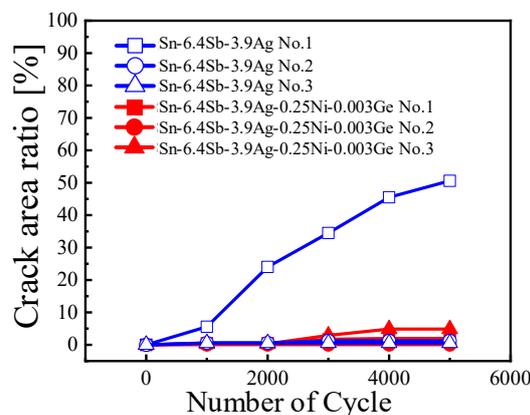


図7 Sn-Sb-Ag系はんだ接合部のパワーサイクル模擬試験によるき裂進展挙動

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 三ツ井恒平, 莊司郁夫, 小林竜也, 渡邊裕彦	4. 巻 9
2. 論文標題 Sn-Sb-Ag系高温鉛フリーはんだ合金の機械的性質に及ぼす微量Ni及びGe添加の影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 スマートプロセス学会誌	6. 最初と最後の頁 133 ~ 139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kobayashi Tatsuya, Mitsui Kohei, Shohji Ikuo	4. 巻 60
2. 論文標題 Effects of Ni Addition to Sn <sub>2</sub> Sb High-Temperature Lead-Free Solder on Its Microstructure and Mechanical Properties	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 888 ~ 894
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MH201809	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kobayashi Tatsuya, Shohji Ikuo	4. 巻 9
2. 論文標題 Evaluation of Microstructures and Mechanical Properties of Sn-10Sb-Ni Lead-Free Solder Alloys with Small Amount of Ni Using Miniature Size Specimens	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 1348 ~ 1348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/met9121348	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ikuo Shohji, Tatsuya Kobayashi, Yusuke Nakata	4. 巻 Vol. 2020 No. 1
2. 論文標題 Large area bonding for power devices by pillar-like IMC effective dispersion control	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Impact	6. 最初と最後の頁 76 ~ 78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Miki Kenji, Kobayashi Tatsuya, Shohji Ikuo, Nakata Yusuke	4. 巻 941
2. 論文標題 Effect of Cooling Rate on Intermetallic Compounds Formation in Sn-Ag-Cu-In Solder	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 2075 ~ 2080
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/MSF.941.2075	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計12件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 山中佑太, 荘司郁夫, 小林竜也, 小幡佳弘, 倉澤元樹
2. 発表標題 パワー半導体用鉛フリーはんだ接合部のパワーサイクル損傷挙動
3. 学会等名 日本金属学会2020年秋期(第167回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本瑞貴, 荘司郁夫, 小林竜也, 三ツ井恒平, 渡邊裕彦
2. 発表標題 Sn-Sb-Ag 系高温鉛フリーはんだの疲労特性に及ぼすNi 添加の影響
3. 学会等名 日本金属学会2020年秋期(第167回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山中佑太, 荘司郁夫, 小林竜也, 渡邊裕彦
2. 発表標題 パワー半導体用Sn-Sb-Ag系はんだ接合部のパワーサイクル損傷挙動
3. 学会等名 Mate 2021(Microjoining and Assembly Technology in Electronics) symposium
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本瑞貴, 莊司郁夫, 小林竜也, 三ツ井恒平, 渡邊裕彦
2. 発表標題 Sn-Sb-Ag系高温鉛フリーはんだのミクロ組織および疲労特性に及ぼす添加元素の影響
3. 学会等名 Mate 2021(Microjoining and Assembly Technology in Electronics) symposium
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三ツ井恒平, 莊司郁夫, 小林竜也, 渡邊裕彦
2. 発表標題 Sn-Sb-Ag系合金の高温疲労特性に及ぼすNiおよびGe添加の影響
3. 学会等名 Mate 2020(Microjoining and Assembly Technology in Electronics) symposium
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三ツ井恒平, 莊司郁夫
2. 発表標題 Sn-Sb-Ag および Sn-Sb-Ag-Ni-Ge 系合金の高温疲労特性調査
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期(第165回)講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohei Mitsui, Ikuo Shohji
2. 発表標題 Investigation of Mechanical Properties of Sn-5Sb and Sn-6.4Sb-3.9Ag Hightemperature Lead-free Solder
3. 学会等名 MS&T19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohei Mitsui, Tatsuya KOBAYASHI, Ikuo SHOHJI, Hirohiko WATANABE
2. 発表標題 Investigation of High Temperature Fatigue Properties and Microstructures of Sn-Sb-Ag alloys
3. 学会等名 Visual-JW2019 & WSE 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Miki, Kobayashi Tatsuya, Shohji Ikuo, Nakata Yusuke
2. 発表標題 Effect of Cooling Rate on intermetallic Compounds Formation in Sn-Ag-Cu-In Solder
3. 学会等名 THERMEC'2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三木健司, 荘司郁夫, 中田裕輔, 林和
2. 発表標題 Sn-Ag-Cu-In 系はんだ接合部でのピラー状IMC 生成に及ぼす接合時冷却速度の影響
3. 学会等名 日本金属学会2018年秋期(第163回)講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三木健司, 荘司郁夫, 中田裕輔
2. 発表標題 Sn-Ag-Cu-In系鉛フリーはんだ接合部中での金属間化合物生成に及ぼす冷却速度の影響
3. 学会等名 スマートプロセス学会平成29年度秋季総合学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三木健司, 荘司郁夫, 中田裕輔, 林和
2. 発表標題 ピラー状金属間化合物分散鉛フリーはんだ接合部生成に及ぼす冷却速度の影響
3. 学会等名 Mate 2018(Microjoining and Assembly Technology in Electronics) symposium
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>マルチスケール組織・界面制御学研究室 研究室紹介  <a href="https://www.me.gunma-u.ac.jp/zai2/shohji/information.html">https://www.me.gunma-u.ac.jp/zai2/shohji/information.html</a>          マルチスケール組織・界面制御学研究室 研究室紹介  <a href="http://www.me.gunma-u.ac.jp/zai2/shohji/information.html">http://www.me.gunma-u.ac.jp/zai2/shohji/information.html</a></p>
---

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------